合肥光源高时间分辨束流损失监测技术研究

刘奕鸿[1] 肖云致[1] 于令达[2] 杨星[3] 马小超[3] 冷用斌[1,3]
1（中国科学技术大学核科学技术学院 合肥 230027）
2（中国科学院高能物理研究所 北京 100049）
3（中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029）

摘要 为了监测并分析合肥光源运行过程中的束流损失特性，开发了一套基于闪烁体探测器、条带电极束流位置监测器(Beam Position Monitor, BPM)和高速示波器的高时间分辨束流损失及束团位置同步监测系统。通过仿真与实测波形对比，验证了系统输出束损脉冲波形的准确性。基于非对称高斯函数拟合的方法提取了束损脉冲信号特征参数。结合 HOTCAP 技术从条带电极信号中提取了逐束团电荷量及位置信息。基于合肥光源储存环的特殊填充模式校正了束损数据与位置数据的时间差，实现了数据同步。利用该系统监测了合肥光源注入瞬态及注入后稳态运行条件下的束损情况，结果表明：稳态运行过程中逐束团束损与电荷量分布呈现显著关联性，与随机束损的理论预期相符；注入瞬态过程中首次观察到补注束团及其之后第 14 号储存束团同时存在显著束损的现象。

关键词 束流损失；逐束团；闪烁体探测器；同步辐射光源
中图分类号 TL594
DOI:

Study on High-Time-Resolution Beam Loss Monitoring Technology for Hefei Light Source II

LIU Yihong[1] XIAO Yunzhi[1] YU Lingda[2] YANG Xing[3] MA Xiaochao[3] LENG Yongbin[1,3]
1(*School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China,Hefei 230027, China*)
2(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
3(*National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,Hefei 230029, China*)

Abstract **[Background]**: Beam loss monitoring is essential for the stable operation of the Hefei Light Source II(HLS-II). Accurate measurement of bunch-by-bunch beam loss and position information helps to diagnose beam instabilities and optimize accelerator performance. **[Purpose]**: This study aims to monitor and analyze the beam loss characteristics during the operation of the HLS-II. **[Methods]**: A high-time-resolution beam loss and bunch position synchronization monitoring system was developed using a scintillator detector, a strip-electrode beam position monitor (BPM), and a high-speed oscilloscope. The accuracy of the system's beam loss pulse waveform output was validated by comparing simulated and measured waveforms. An asymmetric Gaussian fitting method was employed to extract characteristic parameters of the beam loss pulses. Using the HOTCAP (a software package for high-speed oscilloscope-based three-dimensional bunch-by-bunch charge and position measurement) technique, the

中国科学院大科学装置维修改造项目-“加速器束流测控通用信号处理平台”项目资助
第一作者：刘奕鸿，男，2001 年出生，2023 年于华北电力大学，现为硕士研究生，研究领域为束流测控技术
通讯作者：冷用斌，E-mail:lengyb@ustc.edu.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00
Supported by Large-Scale Scientific Facility Renovation and Upgrade Project of the Chinese Academy of Sciences - “Universal Signal Processing Platform for Accelerator Beam Measurement and Control”
First author: LIU Yihong, male, born in 2001, graduated from North China Electric Power University in 2023, master student, focusing on beam measurement and control technology
Corresponding author:LENG Yongbin, E-mail: lengyb@ustc.edu.cn
Received date: 20XX-00-00, revised date: 20XX-00-00

bunch-by-bunch charge and position information were extracted from BPM signals. The time discrepancy between beam loss and position data was corrected based on the unique filling pattern of the HLS storage ring, achieving data synchronization. **[Results]**: This system was used to monitor beam losses during both the transient injection process and steady-state operation of the HLS-II. The results indicate that, during steady-state operation, the bunch-by-bunch beam loss exhibits a significant correlation with the charge distribution, consistent with the theoretical expectations of random beam loss. During the transient injection process, a unique beam loss phenomenon was observed for the first time: significant beam loss occurred simultaneously in the injected bunch and the 14th stored bunch following it. **[Conclusions]**: The measurement system is capable of synchronously acquiring bunch-by-bunch charge, transverse position, longitudinal position, and beam loss data from the HLS-II, providing strong technical support for diagnosing beam instabilities and optimizing accelerator performance.

Key words Beam loss; Bunch-by-bunch; Scintillator detector; Synchrotron radiation source

合肥光源是一台专用真空紫外和软X射线同步辐射光源，主要由800 MeV直线加速器注入器、800 MeV电子储存环、10条同步辐射光束线和多个实验站组成。其储存环基本参数为：能量800 MeV，环周长66.13 m，高频频率204 MHz，谐波数45，回旋周期220.59 ns，束流寿命超过10小时，束流平均流强300 mA。

合肥光源采用局部凸轨注入法注入束流，如图1所示，通过四块冲击磁铁将理想轨道的某一段向外凸起，束流轨道的最大位置处为储存环束流注入点。在注入点处放置一块脉冲切割磁铁，当凸轨幅度达到最大时进行束流注入，注入粒子束经脉冲切割磁铁偏转后平行于凸轨进入储存环接受度，同时封闭轨道按一定规律收缩，使入射电子束避开切割板和真空室壁，进入储存环中完成束流注入[1]。整个从注入到稳定储存运行的过程中存在多种束损机制：首先，注入时电子束可能撞击切割磁铁和真空室壁，导致束流损失；其次，注入新鲜束团的参数可能与储存环稳定运行条件不完全匹配，参数匹配不理想的粒子可能丢失；此外，注入元件的脉冲电磁场可能会扰动储存束流，引起横向或纵向的束流不稳定性，进而引起束流损失。若注入过程中束损持续超标，将严重限制束流注入效率[2]和束流寿命的提升。因此，需要关注和研究注入过程中的束流运动以及束流损失情况，如能研制出具有逐束团诊断能力的束流损失监测系统，监测和分析合肥光源注入瞬态过程以及注入后稳态运行过程中的束流损失，对于优化注入方案、提高注入效率、降低辐射剂量、保障人员和设备安全具有重要意义。

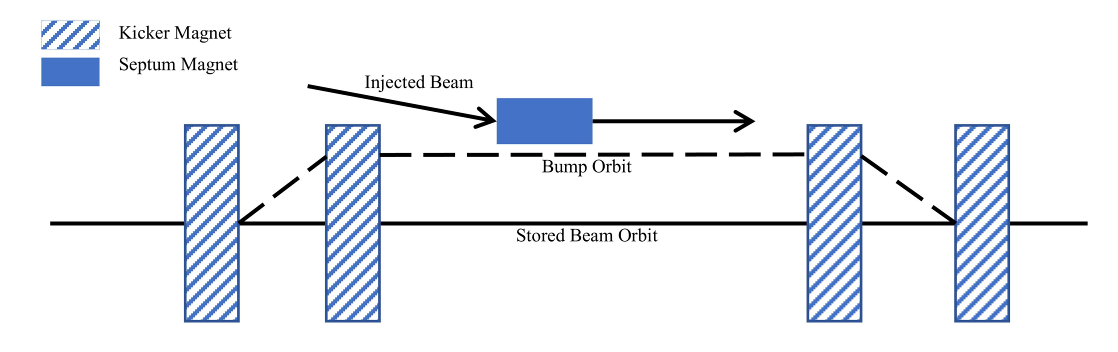


图1 局部凸轨法原理示意图
Fig.1 Diagram of the local bump orbit method

为满足束流诊断和机器保护的需求，不同加速器设施根据其特性选用不同的探测器搭建束流损失监测系统。质子或重离子加速器更为关注损失剂量问题，常选择电离室作为束流损失探测器，其灵敏度高、能量测量范围大、抗辐射能力强，典型案例为欧洲核子中心的超级超导对撞机[3]和中国的散裂中子源[4]，但此类探头响应时间在微秒量级，无法用于电子储存环的高时间分辨束流损失监测。北京正负电子对撞机[5]、上海光源[6]和合肥光源[7]采用双PIN二极管监测不同位置的束流损失，该探测器体积小、对电子敏感且能忽略γ射线的影响，但其死时间为100 ns，仅能用于测量平均束损剂量，无法用于高时间分辨测量。日本J-PARC最早使用闪烁体探测器监测束流损失[8]，其时间响应快，脉冲宽度在几十纳秒，且对背景噪声中的

X 射线不敏感。澳大利亚光源[9]、西伯利亚光源[10]使用基于切伦科夫原理的光纤束损探测器定位束流损失，这种探测器时间响应快（ns 量级），只对带电粒子敏感，但是辐射灵敏度比闪烁体探测器低得多。综上所述，目前束流损失监测技术的主要目标是确定束流损失的空间位置和相对损失率，但尚未在电子储存环中实现逐束团束损的测量。

为实现逐束团逐圈的束损监测分析，本研究选用辐射灵敏度高且时间响应在纳秒量级的闪烁体探测器，结合前期开发的逐束团电荷量及三维位置测量技术[11-13]，设计并搭建了一套高时间分辨束流损失及束团位置同步监测系统，用于对合肥光源运行过程中的束流损失进行监测和分析。

1 高时间分辨束流损失监测系统

1.1 闪烁体+PMT 束流损失监测系统基本工作原理

闪烁体探测器用于监测束流损失的原理如图 2 所示。当储存环中的电子束损失在真空室内壁时，会产生簇射粒子，主要包括簇射电子和 γ 光子[14]。这些簇射粒子在闪烁体中沉积能量，导致闪烁体原子的电离和激发。受激原子退激时，会发射波长位于可见光范围的闪烁光子。闪烁光子通过光导被收集到光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT)的光阴极上，产生光电子。光电子在 PMT 的打拿级上逐级倍增，最终在阳极与最后一个打拿级之间运动时，在输出回路上形成电信号。通常情况下，闪烁体产生的光子数与辐射沉积在闪烁体中的能量成正比，因此输出信号的幅值也与入射辐射的能量成正比。

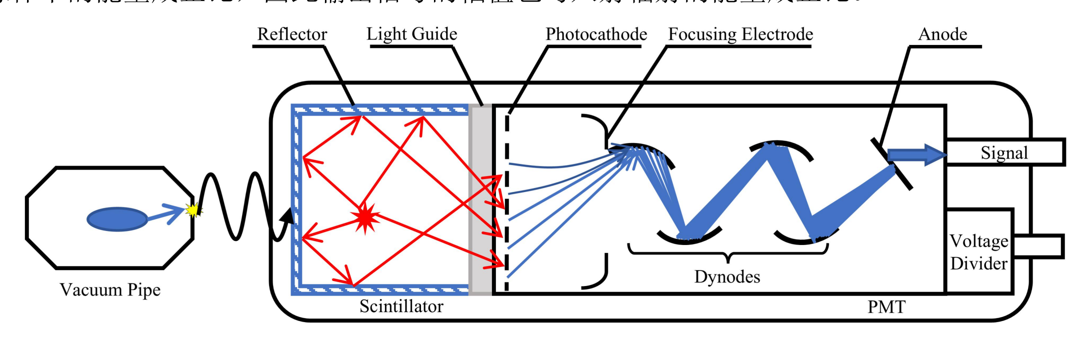


图 2 闪烁体探测器探测束流损失原理图
Fig.2 Schematic of the scintillator detector for beam loss detection

1.2 合肥光源高时间分辨束损监测系统结构设计

本研究基于闪烁体探测器、束流位置监测器(Beam Position Monitor, BPM)和高速示波器，搭建了合肥光源高时间分辨束流损失及束团位置同步监测系统，其结构如图 3 所示，核心组件包括：

1) 闪烁体：采用 ELJEN 公司 EJ-200 型闪烁体，长度 100 mm，直径 22 mm，发光波长 425 nm，光脉冲上升时间 0.9 ns，衰减时间 2.1 ns，半高全宽(FWHM, Full Width at Half Maximum)2.5ns；

2) 光电倍增管：选用 Hamamatsu 公司 H10721-110 型 PMT，探测波长范围 230-700 nm，灵敏度峰值波长 400 nm，上升时间 0.57 ns，半高全宽 1.25ns；

3) 束流位置监测器：用于拾取逐束团束流信号，计算束团横向及纵向位置；

4) 高速示波器：配置 Keysight 示波器，采样率 16 GSa/s，带宽 6.3 GHz，电压分辨率 10 bits。

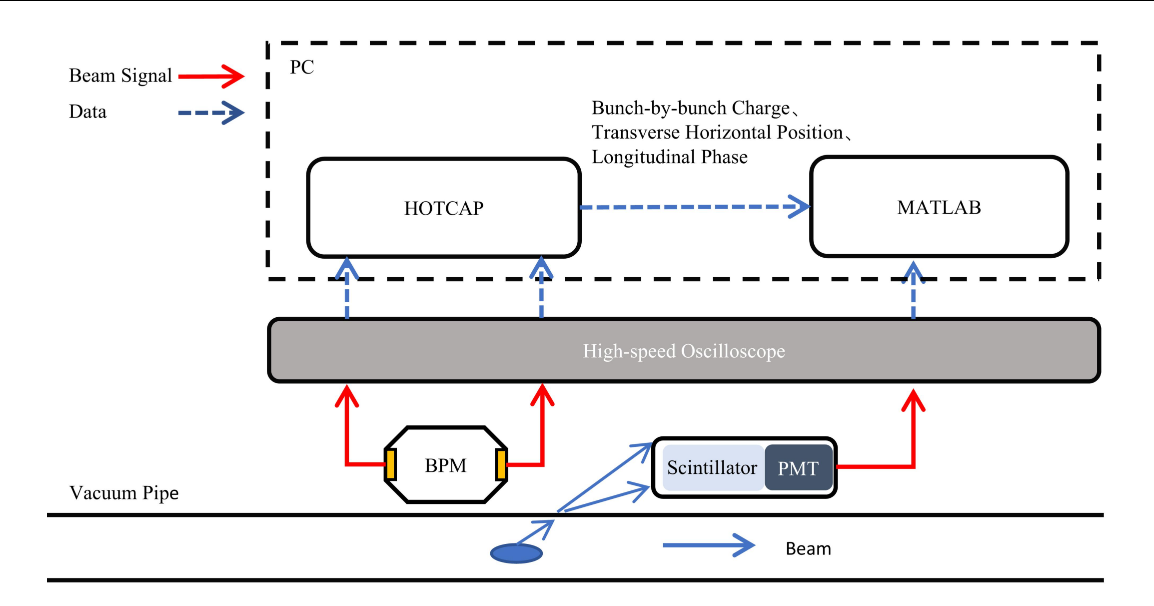


图 3 合肥光源高时间分辨束流损失及束团位置同步监测系统结构示意图
Fig.3 Schematic diagram of the High-Time-Resolution beam loss and bunch position monitoring system at HLS-II

束损信号由闪烁体探测器采集后，经高速示波器数字化存储，并利用 MATLAB 进行离线数据处理，提取束损信号的幅值与时间信息。为关联束损与束团位置，系统集成束流位置监测器，其水平分布的条带电极信号通过示波器另两通道同步采集。BPM 信号经由本课题组开发的 HOTCAP 软件包[15]（基于高速示波器的逐束团三维位置及电荷量精确测量工具）处理，最终输出逐束团的电荷量、横向水平位置及纵向位置等参数。该系统通过多模块协同工作，实现了束损事件的高时间分辨率监测与多维参数共同分析。

1.3 高时间分辨束损监测系统格林函数仿真

辐射与闪烁体相互作用时，能量沉积引发闪烁体产生由闪烁光子构成的光脉冲，其时间特性可表征为上升时间和衰减时间的组合，数学表达式如下[16]：

$$n(t)=\frac{n_{ph}}{\tau_0}(1-e^{-\frac{t}{\tau_1}})e^{-\frac{t}{\tau_0}} \tag{1}$$

式中：n_{ph} 为闪烁光脉冲中的总光子数；τ_0 为闪烁体的发光衰减时间；τ_1 为闪烁体的上升时间。光电倍增管对单个光子输出电流的响应函数可以用高斯函数表示[17]：

$$P(t)=Ae^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

式中：A 为 PMT 幅值系数，代表 PMT 响应单光子输出电流脉冲的峰值；t_0 为电子渡越时间；σ 为电流脉冲的高斯脉宽。通过卷积闪烁光脉冲函数与 PMT 单光子响应函数，得到闪烁体探测器电流脉冲表达式：

$$I(t)=n(t)*P(t) \tag{3}$$

进一步将 PMT 电流输出等效为电流源，探测器输出电压脉冲与电流脉冲关系为：

$$I(t)=\frac{V(t)}{R}+C\frac{dV(t)}{dt} \tag{4}$$

式中，R=50 Ω、C=80 pF 为电压读出电路等效参数。基于上述模型，利用 MATLAB 对闪烁体能量沉积至电压脉冲输出的全过程进行数值仿真。归一化后的仿真结果如图 4 所示，脉冲上升时间为 2.3ns、半高全宽为 7.5ns，显著大于合肥光源的束团间隔(4.9ns)。因此，在高束损率条件下，若多个相邻束团同时在探头处发生束损，其信号将完全堆叠而无法区分。然而，对于非相邻束团的束损事件，可通过反堆叠方法有效分离信号，具体方法详见 1.4 小节。

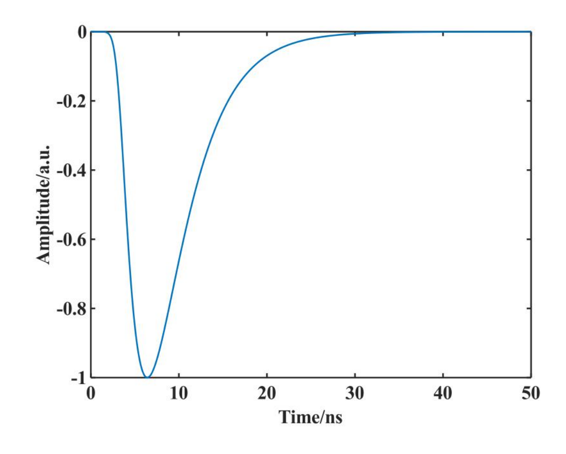


图 4 闪烁体探测器的仿真脉冲波形
Fig.4 The simulated pulse waveform of the scintillator detector

1.4 束流损失信号处理方法

合肥光源储存环回旋周期为220.59 ns，采用16 GSa/s采样率的高速示波器对束损信号进行数字化采集，每圈对应3529个采样点。为提取束损脉冲的幅值与时间信息，对束损信号进行逐圈切片处理，每圈截取3528个采样点，形成连续的逐圈数据集。图5为逐圈切片后某一圈的实测典型束损波形，脉冲上升时间为2.8ns、半高全宽为7.5ns，与仿真结果在关键参数上高度一致，波形相关系数达R=0.978，验证了系统输出束损脉冲波形的准确性。

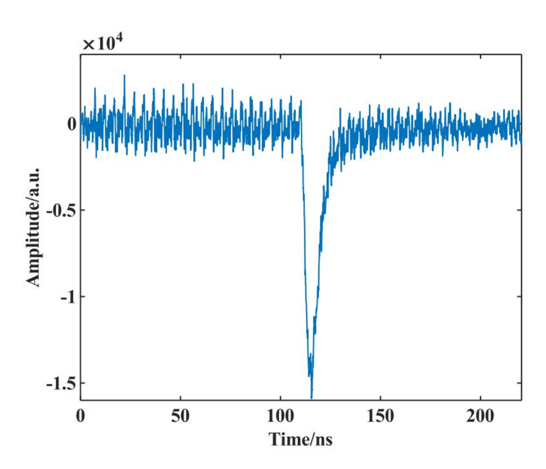


图 5 闪烁体探测器实测的典型束损波形
Fig.5 Typical waveform of beam loss detected by the scintillator detector

在稳态运行时，束损信号幅度较小且信噪比低，需通过滤波增强信号特征。通过对比束损脉冲与噪声信号的功率谱分布(图6)，发现二者在归一化频率低于0.048π rad/sample范围内存在显著差异，据此确定低通滤波器的通带截止频率为0.048π rad/sample。

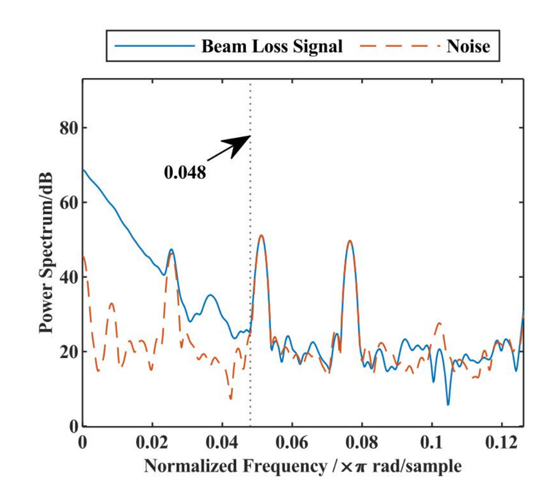


图 6 束损信号和噪声信号的功率谱
Fig.6 Power spectrum of beam loss signal and noise signal

采用 Kaiser 窗型低通滤波器(阻带衰减 60 dB)对信号进行预处理，抑制高频噪声干扰。滤波后，利用非对称高斯函数对束损脉冲进行拟合，其表达式为：

$$f(x)=Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2[\sigma+\alpha(x-\mu)]^2}}+C \tag{5}$$

式中 A 为幅值，决定了函数峰值的高度；μ为峰值时间；σ为脉宽，控制脉冲宽窄程度；α为非对称因子，α>0 时右侧展宽，反之左侧展宽；C 为基线偏移量。拟合后，束损幅值由 A−C 表征，峰值时间由μ确定。

在注入过程中，束损频率显著增加，导致信号出现脉冲堆叠现象(图 7 虚线)。为了更精确地提取束损脉冲的幅值和时间，需要对堆积脉冲进行识别和重建。首先采用相同低通滤波器消除背景噪声，之后利用 MATLAB 的寻峰函数识别脉冲数量及分割点，完成后按分割点顺序，依次对首个脉冲进行非对称高斯拟合，提取幅值(A-C)与时间(μ)参数，随后从原始信号中扣除已拟合脉冲分量，重复此过程直至所有脉冲解析完成(图 7 实线)。

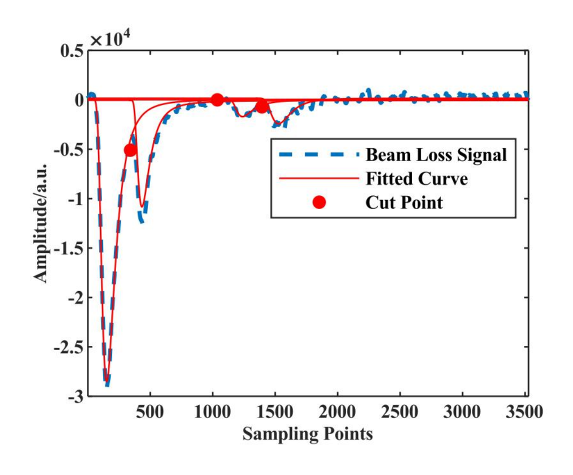


图 7 脉冲堆积信号的拟合结果
Fig.7 Fitting results of pulse stacking signal

1.5 BPM 信号处理方法

合肥光源储存环上 BPM 实测的原始信号时域波形如图 8 所示。该信号携带束团的电荷量、束团长度、横向位置及纵向相位等多维度信息。实验中，通过高速示波器同步采集两个水平分布的条带电极信号，并将其输入 HOTCAP 软件包进行数据处理与分析，可提取逐束团的电荷量、横向水平位置逐圈变化以及纵向相位逐圈变化信息[18]。注入过程中测得的典型逐束团电荷量及位置数据如图 9 所示。

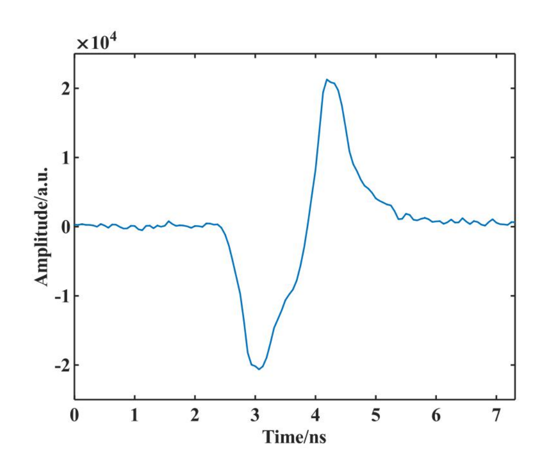
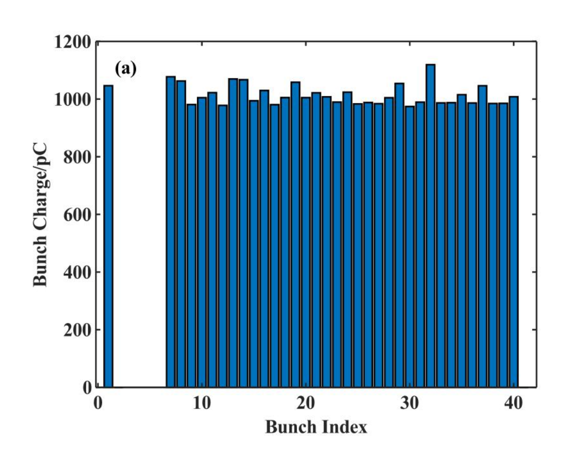


图 8　典型 BPM 信号时域波形
Fig.8　Typical BPM signal waveform in the time domain



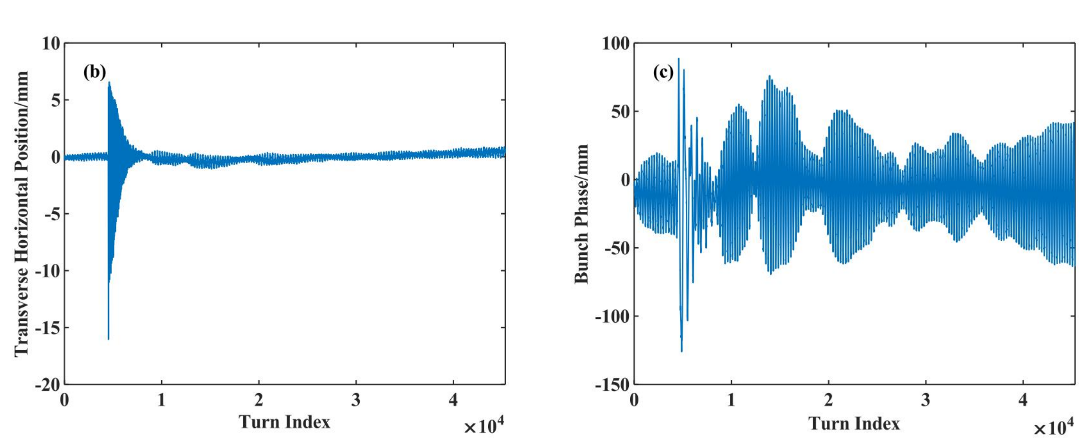


图 9　逐束团电荷量及位置测量结果
(a)逐束团电荷量分布，(b)横向水平位置逐圈变化，(c)纵向相位逐圈变化
Fig.9　Bunch-by-bunch charge and position measurement results
(a) Bunch-by-bunch charge distribution, (b)Turn-by-turn variation of the transverse horizontal position, (c)Turn-by-turn variation of the longitudinal phase

2　束流实验

合肥光源正常运行时束流损失主要集中于二级磁铁下游区域[19]，因此实验中将闪烁体探测器安装于二级磁铁后方，并紧邻该位置的 BPM，现场安装实物如图 10 所示。在恒流（Top-up）运行模式下，分别对注入瞬态过程及注入后稳态运行过程中的束流损失情况进行了监测。实验期间，储存环填充 35 个束团，平

均流强为 300 mA。

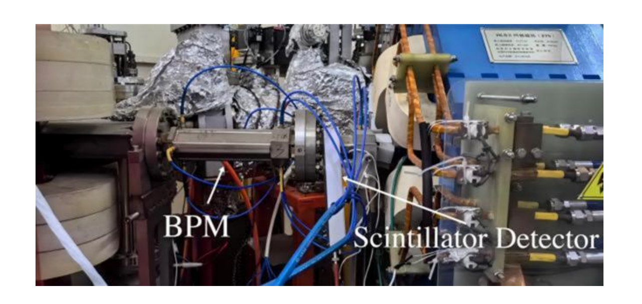


图 10　探头安装现场实物照片
Fig.10　Photo of the installed detectors on-site

2.1　稳态运行时的束流损失

采用 1.4 节所述束损信号处理方法，生成稳态运行束损散点图(图 11)，其中横轴为采样点(每圈 3528 点)，纵轴为圈数，颜色映射束损相对幅值。

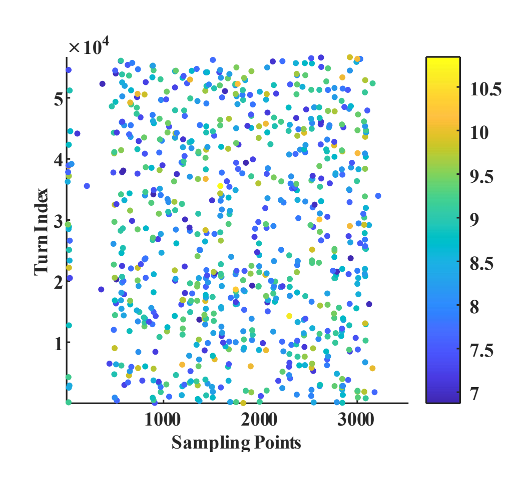


图 11　稳态运行时的束损散点图
Fig.11　Beam loss scatter plot during steady-state operation

合肥光源高频频率为 204 MHz，对应每个束团间隔(bucket)宽 4.9 ns，经 16 GSa/s 采样后，每个 bucket 对应 78.4 个采样点。据此将全环 45 个 bucket 分割，计算各 bucket 平均每圈的束损值，作为对应束团的束流损失率。由于束损信号与 BPM 信号之间存在固定延时差，二者的数据需通过时间戳匹配对齐，因为合肥光源运行中采用了一个特殊的填充模式（35 个束团构成的连续束团串，加 1 个独立单束团，如图 9(a)所示），所以可以借助此填充模式的特征来进行数据对齐。具体方法为：基于逐束团束损率分布识别独立束团，并将其与逐束团电荷量数据中的独立束团编号对齐，从而实现束损数据与 BPM 逐束团数据的关联。图 12 显示对齐后的逐束团束流损失率分布，其分布与储存环填充模式一致，且空束团位置未出现显著束损信号，表明该系统在稳态运行、低剂量率条件下具备逐束团束损分辨能力，空束团处微弱信号可归因于环境散射辐射的探测噪声。

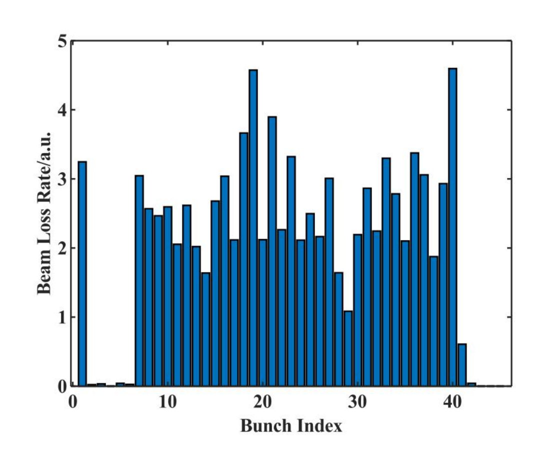


图 12　稳态运行时不同束团的相对束损率
Fig.12　Bunch-by-bunch relative beam loss rate during steady-state operation

2.2　注入过程中的束流损失

在注入过程中，由于束损频率极高，多个相邻束团在探头附近同时发生束损的情况较为常见，导致不同束团产生的束损信号重叠严重，单圈内很难精确定位是哪一个束团发生束损并计算其束损幅值，仅能确定束损束团的大致区间。对合肥光源四组注入过程的束损监测数据进行分析，其结果如图 13 所示，除补注束团存在明显大剂量束损之外，补注束团后第 14 个储存束团附近亦出现显著束损。

补注束团的束损大概率来自于新鲜注入束团参数与储存环参数的不完全匹配，可以通过优化调整注入器参数，调整储存环注入系统参数，提高匹配度来尽可能降低这一束损。而补注束团后第 14 个储存环束团附近的束损，极大概率可归因于注入过程中束流偏离稳态后引起的束流不稳定性，即注入过程中束流在横向和纵向均大幅度偏离平衡位置，从而激励起较大强度的瞬态尾场，经束团间非线性相互作用引发后续束团的不稳定性。其物理机制需通过设计针对性束流实验，并结合束流逐束团三维位置数据进行更为细致的关联分析，才能进一步研究确认。

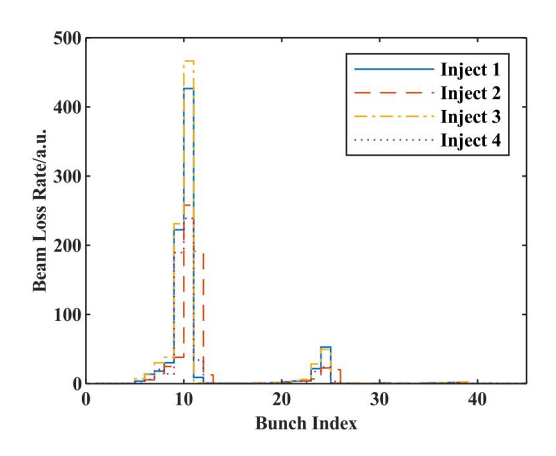


图 13　注入过程的束流损失率
Fig.13　Beam loss rates during injection processes

3　讨论

受限于闪烁体探测器的时间分辨率（典型半高全宽 7.5 ns），该系统不能直接得到严格的逐束团束损测量数据。当储存环中束团间隔大于 7.5 ns 时，系统可实现逐束团信号的完全区分，满足逐束团束损监测需求。对于束团间隔小于 7.5 ns 的加速器，在低束损剂量的稳态运行条件下，可以通过束损信号与 BPM 信号之间的关联分析，精确定位束流损失来自于哪一个束团。但对于注入过程或其他高束损率的运行工况，若多个相邻束团在探头附近都发生束损，则无法实现逐束团的分辨，且导致束损幅值提取误差显著增大。

为拓展系统的适用范围并实现严格的逐束团监测，未来可考虑以下改进方向：一是采用时间响应更快的束损探测器，如基于契伦科夫原理的光纤束损探测器，以提升时间分辨率；二是结合机器学习或深度学习技术，优化脉冲反堆叠算法，以应对高束损率场景的复杂信号解析需求。这些改进将进一步提升系统的诊断精度与适用性，为更多加速器设施的束流损失监测提供可靠支持。

4 结语

本研究基于闪烁体探测器、束流位置监测器及高速示波器，在合肥光源储存环上设计并成功搭建了一套高时间分辨束流损失及束团位置同步监测系统。束流实验实测结果与数值仿真结果完全吻合，验证了系统输出束损脉冲波形的准确性。针对注入过程中束损脉冲堆叠现象，提出基于非对称高斯模型拟合的方法，可精确提取堆叠脉冲的幅值与时间信息。实验结果表明，该系统能够有效监测电子储存环逐束团的束流损失特性，实现电荷量、横向水平振荡及纵向相位等多维参数的同步监测。在注入过程中，观测到补注束团后的第 14 个储存束团束损率显著超出其它储存环束团的现象，暗示该效应可能与束团间尾场耦合或非线性动力学扰动相关。未来需设计更多更有针对性的束流实验，进一步研究分析其物理机制，并基于此优化注入过程，降低束损并提升注入效率。测量系统能够同步采集到逐束团电荷量、横向位置、纵向位置以及束损数据的能力，为后续分析此类复杂的束流动力学过程提供了很好的技术支撑。

受限于闪烁体探测器的时间响应特性，系统在高束团密度或高束损频率场景下的逐束团束损诊断能力存在一定局限性。未来，通过采用更快时间响应的探测器并结合机器学习技术优化信号解析算法，有望进一步提升系统的逐束团监测能力，为更多类型的加速器设施提供更广泛的应用支持。

作者贡献声明 刘奕鸿负责数值仿真、数据处理和整理、文章的起草和最终版本的修订；肖云致负责数据处理和整理；于令达负责束损设备支持；杨星负责 BPM 数据处理；马小超负责束损探头安装调试；冷用斌负责研究的提出、方案的指导、文章最终版本的修订。

参考文献

1 刘淑会.HLSⅡ储存环脉冲四极磁铁注入系统设计研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学,2011.
Study of Injection Scheme Using Pulsed Quadrupole for HLS Ⅱ Storage Ring[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.

2 黄明阳,许守彦,卢晓含,等.中国散裂中子源加速器注入束流损失调节研究[J].原子能科学技术,2019,53(09):1708-1714. DOI: 10.7538/yzk.2019.53.09.1708.
HUANG Mingyang,XU Shouyan,LU Xiaohan, et al. Study on Injection Beam Loss for China Spallation Neutron Source Accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(09): 1708-1714. DOI: 10.7538/yzk.2019.53.09.1708.

3 Saccani M, Effinger E, Viganò W, et al. The Beam Loss Monitoring System after the LHC Long Shutdown 2 at CERN[C]//11th International Beam Instrumentation Conference (IBIC'22), Kraków, Poland, 11-15 September 2022. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2022: 220-224. DOI: 10.18429/JACoW-IBIC2022-TUP03.

4 曾磊,田建民,邱瑞阳,等.CSNS 束流损失测量系统设计[J].强激光与粒子束,2019,31(01):84-89. DOI: 10.11884/HPLPB201931.180198.
Zeng Lei,Tian Jianmin,Qiu Ruiyang, et al. Design of the CSNS beam loss monitor system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(01): 84-89. DOI: 10.11884/HPLPB201931.180198.

5 何俊,赵晓岩,汪林,等. BEPCⅡ束损系统研究[J]. 核技术, 2015, 38(10): 15-21. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100103.
HE Jun,ZHAO Xiaoyan,WANG Lin, et al. Study on beam loss system of BEPCⅡ[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(10): 15-21. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100103.

6 侯磊.上海光源储存环束流损失监测系统研制与应用[D]. 北京: 清华大学,2009.
Design and Application of the Beam Loss Monitoring System for the Storage Ring of SSRF[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.

7 陈裕凯.合肥光源（HLSII）储存环束流损失监测系统的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学,2015.
The Study of the New Type BLM System for the HLSII Storage Ring[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.

8 Miura A, Maruta T, Sako H, et al. Beam loss detected by scintillation monitor[C]//The second International Particle Accelerator Conference(IPAC’11)，JACoW Publishing, Geneva, Switzerland，2011: 1257-1259.

9 Giansiracusa P J, Boland M J, Holzer E B, et al. A distributed beam loss monitor for the Australian Synchrotron[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 919: 98-104. DOI: 10.1016/j.nima.2018.12.054.

10 Maltseva Y I, Ivanenko S V, Khilchenko A D, et al. Beam loss monitoring system for the SKIF synchrotron light source[J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(5): T05004. DOI: 10.1088/1748-0221/17/05/t05004.

11 邓又铭,冷用斌,周逸媚,等.电子储存环逐束团诊断技术研究进展[J].核技术,2024,47(10):18-28. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.100201.
DENG Youming,LENG Yongbin,ZHOU Yimei, et al. Current status and latest developments in electron storage ring bunch-by-bunch beam diagnostic techniques[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(10): 18-28. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.100201.

12 Yang X, Wang H S, Zhou Y M, et al. Determining beam transverse absolute position by triangulation of multi-electrode signal phase differences[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, 35(8): 133. DOI: 10.1007/s41365-024-01498-y.

13 Deng Y M, Leng Y B, Xu X Y, et al. Ultrahigh spatiotemporal resolution beam signal reconstruction with bunch phase compensation[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, 35(5): 89. DOI: 10.1007/s41365-024-01444-y.

14 Vylet V, C. Liu J. Radiation protection at high energy electron accelerators[J]. Radiation protection dosimetry, 2001, 96(4): 333-343.DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006622.

15 Xu X Y, Leng Y B, Gao B, et al. HOTCAP: a new software package for high-speed oscilloscope-based three-dimensional bunch charge and position measurement[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, 32(11): 131. DOI: 10.1007/s41365-021-00966-z.

16 汪晓莲, 李澄, 邵明 . 粒子探测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
WANG Xiaolian, LI Cheng, SHAO Ming. Particle detection technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.

17 Chen Z, Li X, Li X, et al. A correction method for range walk error in time-correlated single-photon counting using photomultiplier tube[J]. Optics Communications, 2019, 434: 7-11. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.10.041.

18 杨星,冷用斌,周逸媚. 逐束团三维信息提取软件 HOTCAP 的实时性能优化[J]. 核技术, 2024, 47(02): 27-34. DOI：10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020102.
YANG Xing,LENG Yongbin,ZHOU Yimei, et al. Real-time optimization of bunch-by-bunch 3D information extraction software HOTCAP[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(02): 27-34.DOI：10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020102.

19 李裕熊,李珏忻,李为民,等. 新型储存环束流损失监测系统[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, (Z1): 500-504. DOI:10.3969/j.issn.0253-2778.2007.04.027.
Li Yuxiong, Li Juexin, Li Weimin, et al. A new storage ring beam loss monitoring system[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007(Z1): 500-504. DOI:10.3969/j.issn.0253-2778.2007.04.027.